

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/54/6

О.И. Казакова, И.Ю. Смолин, И.М. Безмозгий

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМЫХ ДЕМПФИРОВАНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ¹

Статья посвящена рассмотрению амплитудно-зависимых коэффициентов демпфирования на примере плоских образцов из алюминиевого сплава АМг6. Приведены результаты экспериментальных исследований затухающих и вынужденных колебаний образцов, а также их анализ. Выявлены зависимости параметров демпфирования образцов и материала от напряжений и описан подход к их использованию при решении динамических задач численными методами.

Ключевые слова: колебания, напряжённое состояние, амплитудно-зависимые демпфирования, конечно-элементное моделирование.

В настоящее время все большую популярность набирает концепция «цифровых двойников» изделия, иными словами расчетная математическая модель [1, 2]. В области ракетно-космической техники, где основными воздействиями на изделия являются затухающие во времени переходные процессы [3], важной составляющей цифрового двойника является конечно-элементная динамическая модель (КЭМ) изделия. К ней предъявляется ряд требований. Во-первых, модель должна иметь внешнее соответствие реальному изделию. Во-вторых, позволять проводить на ее основе моделирование динамических испытаний, а также иметь возможность настройки по результатам испытаний. В-третьих, верифицированная модель должна достоверно моделировать поведение конструкции тогда, когда нет возможности проводить испытания.

В общем виде решение на КЭМ с n степенями свободы представляет собой решение следующего уравнение [4]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P, \quad (1)$$

где M – матрица масс, C – матрица демпфирования, K – матрица жесткости, u – вектор узловых перемещений, P – вектор внешних сил. Отсюда следует, что модель будет давать достоверный результат только в случае правильно построенных матриц масс, жесткости и демпфирования. И если в случае матриц масс и жесткости данная задача является хоть и весьма трудоемкой, но реализуемой с использованием современных конечно-элементных (КЭ) пакетов, путем верификации модели по результатам испытаний, то в случае матрицы демпфирования возникает ряд проблем. Связаны они с тем, что во всех известных авторам КЭ-пакетах демпфирование задается в трех основных формах: 1) постоянное, в случае обще конструкционного демпфирования; 2) пропорциональное матрице жесткости, в

¹ В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта 8.2.19.2018 в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ (экспериментальные исследования) и в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23 (численное моделирование).

случае внутреннего демпфирования, 3) пропорционального матрице масс, в случае внешнего демпфирования. В некоторых случаях вместо постоянного демпфирования КЭ-пакеты позволяют задавать разные значения в выбранных диапазонах частот. Однако в реальных конструкциях величина конструкционного демпфирования зависит не столько от частоты, сколько от амплитуды и формы распределения напряжений [5 – 8].

В то же время проводятся попытки реализовать данное поведение на математических моделях. С.Дж. Эллиотт [9] приводит математическое моделирование системы с двумя степенями свободы с учетом наличия в ней нелинейного демпфера. Однако в его расчетах демпфирование зависит от первой производной перемещения.

Данная статья посвящена изучению зависимостей демпфирования от уровня напряжений/деформаций в наиболее распространенном в изделиях ракетно-космической техники материале – алюминиевом сплаве АМг6, а также возможностям применения данных зависимостей для расчетов на основе КЭМ.

Амплитудно-зависимое демпфирование

В литературе широко представлены значения коэффициентов демпфирования [7]. Данные значения являются либо свойством конкретного образца, на котором проводится исследование, или представляют собой одно значение, советуемое конкретному уровню напряжений. Проводятся такие исследования на равномерно напряженном образце, например, растяжением-сжатием пластины, или кручением трубчатого образца. Данные характеристики не универсальны и, если их использовать при расчете сложных КЭМ-изделий, то результаты могут оказаться неверными.

Однако в случае переменного изгиба пластин или кручении толстостенных трубок распределение напряжений становится неоднородным и это обстоятельство требует дополнительных усилий для перехода от демпфирующих характеристик образца к характеристике материала. Рассеяние энергии в изотропном материале при сложно-напряженном состоянии при колебаниях должно зависеть от амплитуд инвариантов напряжения. В частности, для пластичных материалов в качестве такого инварианта следует использовать интенсивность напряжений или эквивалентные напряжения по Мизесу [6]. Такую зависимость уровня демпфирования от напряжения в материале, получаемую на основе экспериментальных данных, удобно аппроксимировать степенной функцией [10]

$$\psi(\sigma_i) = k\sigma_i^n. \quad (2)$$

где k , n – характеристики материала, которые в определенном диапазоне частот и температур можно считать постоянными, а σ_i – амплитуда интенсивности напряжений. В случае амплитудно-независимого демпфирования $n = 0$.

В реальных конструкциях кроме демпфирования в материале также присутствуют другие виды демпфирования (конструкционное, внешнее). В связи с этим экспериментальную характеристику образца целесообразно представлять как сумму

$$\tilde{\psi} = \psi_{\text{нач}} + \psi(\sigma_i), \quad (3)$$

где $\psi_{\text{нач}}$ – величина коэффициента рассеяния энергии при малых напряжениях.

Экспериментально-расчетное исследование алюминиевых образцов

Для целей данного исследования были изготовлены и испытаны плоские образцы из алюминиевого сплава АМг6. Для определения зависимостей рассеяния энергии в материале от напряжений к образцам были применены следующие виды экспериментальных исследований: определение резонансной кривой, полученной при вынужденных колебаниях, и определение виброграммы свободных затухающих колебаний для оценки затухания за цикл при свободных колебаниях.

В процессе испытаний образец имел консольное закрепление. Исследования проводились по первой форме колебаний, которая соответствует изгибной форме колебаний и частоте порядка 17,2 Гц. Данная частота обусловлена закреплением в консольной части образца стальной пластины. Она позволяет достигнуть больших уровней напряжений в материале. Схема испытаний представлена на рис. 1. Контроль напряжений осуществлялся по показаниям тензодатчика (Т2), расположенного в месте максимальных напряжений – корне образца, контроль ускорений осуществлялся с помощью трехкомпонентного вибропреобразователя (В1), установленного на незакрепленной стороне образца.

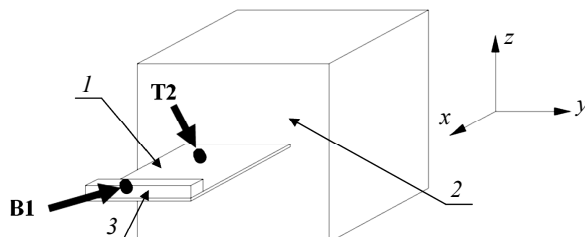


Рис. 1. Схема испытаний образцов (1 – образец, 2 – оснастка, 3 – стальная накладка)

Fig. 1. Scheme of the tests of samples: 1 – sample, 2 – mounting, and 3 – steel strip

Затухающие свободные колебания

Первый вид испытаний на образцах проводился приложением импульсной нагрузки к свободному краю образца. Виброграмма, полученная при этих испытаниях и отфильтрованная для исключения высоких частот, представлена на рис. 2.

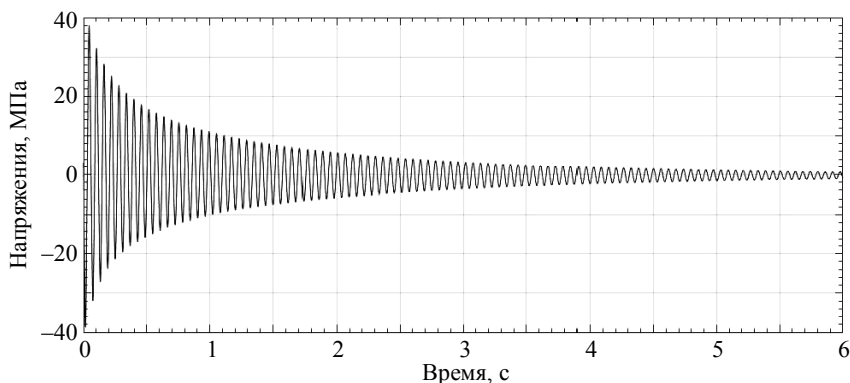


Рис. 2. Развертка затухающих колебаний

Fig. 2. Time-base of the damped oscillations

Уровень рассеяния энергии при затухающих колебаниях обычно оценивается логарифмическим декрементом колебаний. Несмотря на то, что изначально понятие логарифмического декремента колебаний было введено для линейной колебательной системы при экспоненциальном законе затухания, в случае амплитудно-зависимого демпфирования в системе данную характеристику можно использовать, если считать ее переменной величиной и определять по усредненным значениям между соседними амплитудами одного цикла. Усреднённое значение логарифмического декремента вычисляют по формуле

$$\delta_i = \ln \left(\frac{a_i}{a_{i+T}} \right), \quad (4)$$

где a_i и a_{i+T} – амплитуды колебаний в начале и конце рассматриваемого цикла i , T – период колебаний.

На рис. 3, *а* показана взаимосвязь амплитуд замеренных виброускорений в свободной части образца и напряжений (деформаций) в корне образца. На рис. 3, *б* представлено значение логарифмического декремента затухания, определенного по формуле (4), отнесенного к средней амплитуде колебаний $a_{i+T/2}$, как функции напряжений, которые соответствуют этой амплитуде колебаний.

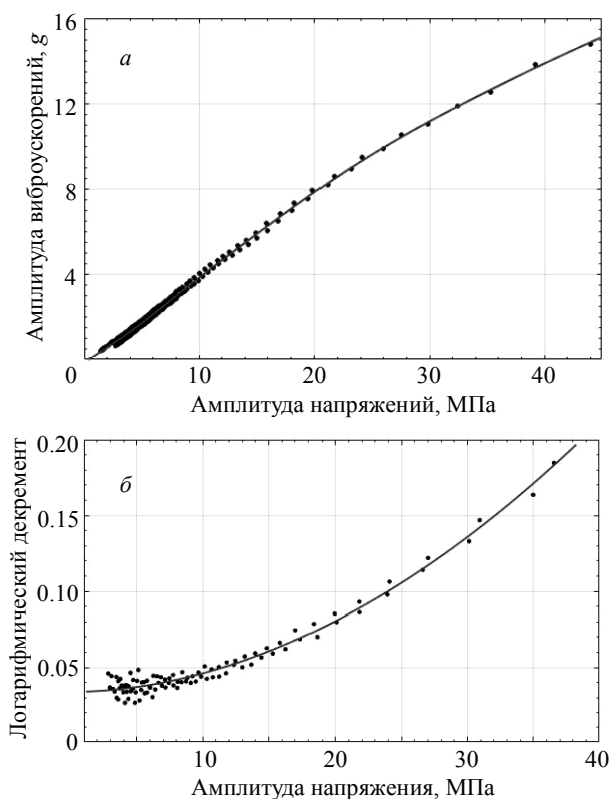


Рис. 3. Характеристики затухающего процесса колебаний образца: точки – экспериментальные данные, кривые – аппроксимация

Fig. 3. Characteristics of the damped oscillations of the sample: the dotted line is the experimental data and the solid line is the approximation

Видно, что нелинейность зависимости виброускорений от напряжений наблюдается только выше 25 МПа, при этом логарифмический декремент нелинейно зависит от уровня напряжений даже при невысоких значениях напряжений.

Логарифмический декремент колебаний используется для определения уровня рассеяния энергии в системе при затухающих колебаниях из-за удобства определения, однако более точно демпфирующая способность колебательной системы определяется относительным рассеянием энергии (коэффициентом поглощения):

$$\psi(a) = \frac{\Delta U(a)}{U(a)}, \quad (5)$$

где $U(a)$ – амплитудное значение энергии упругого деформирования. Данные характеристики обычно связывают формулой

$$\psi = 2\delta, \quad (6)$$

справедливой в случае вязкого трения. Для систем с нелинейным сопротивлением данная формула справедлива только при малом значении декремента. При большом затухании В.В. Матвеевым было предложено [11] дифференциальное определение логарифмического декремента затухания:

$$\delta(a) = -\frac{4\pi}{a\omega(a)} \left[\frac{a}{\omega(a)} \frac{d\omega(a)}{da} + 1 \right] \frac{da}{dt}. \quad (7)$$

Полученные на основе формул (6) и (7) результаты были аппроксимированы степенной зависимостью в соответствии с уравнением (2). На рис. 4 представлены эти аппроксимированные кривые относительного рассеяния энергии (кривая 1 – получена по формуле (6), кривая 2 – по формуле (7)). Полученные по экспериментальным данным по затуханию характеристики составили для кривой 1 – $\psi_{\text{нач}} = 0.0392$ (3.92%), $k = 9.092415 \cdot 10^{-4} (\text{МПа})^n$, $n = 1.7238$; для кривой 2 – $\psi_{\text{нач}} = 0.0375$ (3.75%), $k = 7.346413 \cdot 10^{-4} (\text{МПа})^n$, $n = 1.6403$. Аппроксимированные кривые дают практически одинаковый результат в диапазоне напряжений от 0 до 20 МПа. Это свидетельствует о применимости формулы (6) при небольших уровнях напряжений.

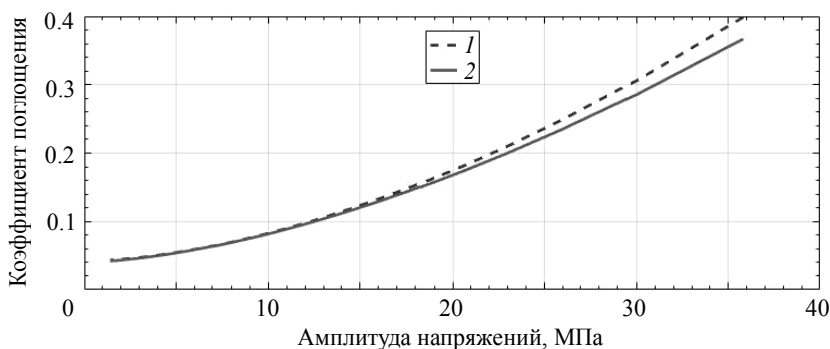


Рис. 4. Зависимость рассеяния энергии в образце от амплитуды напряжений

Fig. 4. Energy absorption coefficient of the sample as a function of stress amplitude

Вынужденные колебания

Второй вид испытаний проводился при воздействии гармонической силы с различными уровнями (0.3, 1.0 и 1.5g). Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные по измерениям напряжений в месте установки тензорезистора, представлены на рис. 5.

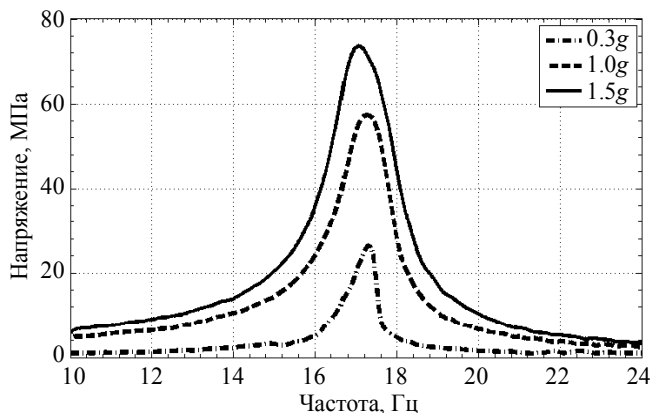


Рис. 5. АЧХ образца

Fig. 5. Amplitude-frequency response of the sample

Используя эти АЧХ, значения демпфирования для образца при уровне относительных напряжений 70 % от резонансных значений могут быть определены по широко известной формуле

$$\psi_{0.7} = 2\pi \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_r}, \quad (8)$$

где ω_r – резонансная частота, ω_1 и ω_2 – частоты, соответствующие 70 %-му уровню напряжений.

Обработка полученных АЧХ для других значений напряжений с целью определения зависимости характеристик демпфирования от напряжений была произведена по предложенной Б.Ф. Шорром и Н.Н. Серебряковым методике [12]. Были получены значения коэффициента рассеяния при небольшом уровне относительных напряжений, составляющих 15–20 %, по формуле

$$\begin{aligned} \psi_p &= 2\pi [\tilde{\sigma}(\Delta\bar{\omega})] \Delta\bar{\omega}, \\ \Delta\bar{\omega} &= \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_p}, \end{aligned} \quad (9)$$

где ω_1 и ω_2 – частоты, соответствующие уровню напряжений $\tilde{\sigma}$, ω_p – резонансная частота.

Далее были получены значения демпфирования при меньших нерезонансных уровнях напряжений по формуле

$$\psi(\tilde{\sigma}) = 2\pi \sqrt{\left(\frac{\psi_p}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{\tilde{\sigma}^2} - \Delta\bar{\omega}^2}. \quad (10)$$

Полученные значения отмечены точками на рис. 6, через них была проведена аппроксимирующая кривая, согласно формулам (2) и (3). На характер получаемой таким образом зависимости сильно сказывается количество точек, использованных для ее построения. В данном случае с помощью уравнения (10) были получены значения демпфирования при нерезонансных уровнях напряжений, составляющих 50, 70 и 90 % от резонансного значения.

Характеристики аппроксимирующих кривых при ψ_p , полученной на уровне 15 % от резонансного значения имеют следующие значения: $\psi_{нач} = 0.0662$ (6,6 %), $k = 0.0027$ (МПа)ⁿ, $n = 1.0893$ и на уровне 20 % – $\psi_{нач} = 0.0970$ (15,1 %), $k = 5.3271 \cdot 10^{-4}$ (МПа)ⁿ, $n = 1.4453$.

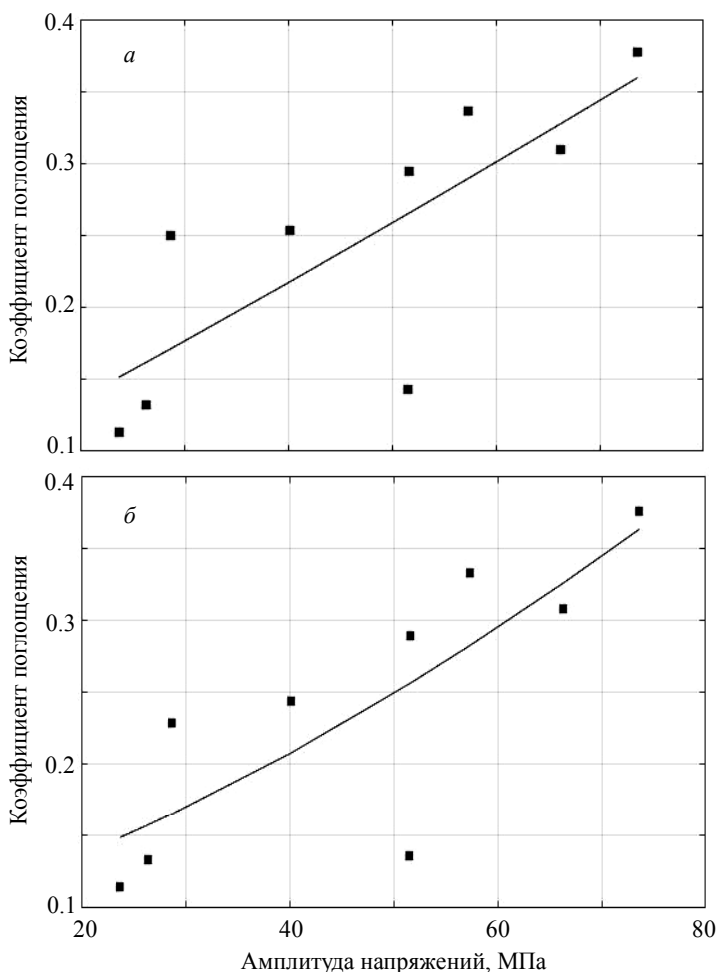


Рис. 6. Зависимость относительного рассеяния энергии в образце от амплитуды напряжений (*a* – ψ_p получено при 15 % от резонансного значения напряжений, *б* – ψ_p получено при 20 % от резонансного значения напряжений)

Fig. 6. Energy absorption coefficient of the sample as a function of stress amplitude: ψ_p was obtained at (*a*) 15 % and (*b*) 20 % of the stress resonant value

Определение зависимостей коэффициентов демпфирования в материале

Все полученные выше зависимости характеризуют уровень демпфирования в образцах. При изгибных колебаниях образцов распределение напряжений неоднородное, что требует дополнительного анализа для перехода к характеристике рассеяния энергии в материале.

Для образца в целом полная энергия получается из суммы

$$U_{\Sigma 0} = U_{\phi 0} + U_{V 0}, \quad (11)$$

где $U_{\phi 0}$ – энергия формоизменения, $U_{V 0}$ – энергия изменения объема. Индекс 0 здесь и в дальнейшем означает свойство образца.

При этом уменьшение энергии образца при ее диссипации за счет неупругих деформаций определяется только, за счет изменения формы образца:

$$\Delta U_{\Sigma 0} = \Delta U_{\phi 0} = \int_{V_0} \Delta U(\sigma_i) dV = \int_{V_0} \psi_{\phi}(\sigma_i) U_{\phi}(\sigma_i) dV, \quad (12)$$

где V_0 – объем образца.

Из формул (5) и (12) следует, что

$$\begin{aligned} \psi_0(\sigma_k)(1 + \vartheta) &= \psi_{\phi 0}(\sigma_k) = \psi_{\phi}(\sigma_i), \\ \vartheta &= U_{V 0} / U_{\phi 0}, \end{aligned} \quad (13)$$

где σ_k – амплитуда напряжений, измеренная тензорезистром (контрольное напряжение); σ_i – амплитуда интенсивности напряжений.

При сложном напряженном состоянии колеблющегося тела энергия формоизменения единичного объема равна:

$$U_{\phi}(\sigma_i) = \frac{\sigma_i^2}{6G}, \quad (14)$$

где G – модуль сдвига.

Амплитуда интенсивности напряжений в любой точке образца произвольной геометрии равна

$$\sigma_i = \sigma_k \bar{\sigma}_i, \quad (15)$$

где $\bar{\sigma}_i$ – относительная амплитуда интенсивности напряжений.

Отсюда

$$U_{\phi 0} = \frac{1}{6G} \sigma_k^2 \int_{V_0} \bar{\sigma}_i^2 dV, \quad \Delta U_{\phi 0} = \frac{k}{6G} \sigma_k^{2+n} \int_{V_0} \bar{\sigma}_i^{2+n} dV. \quad (16)$$

Следовательно,

$$\psi_{\phi 0}(\sigma_k, \eta) = \frac{\Delta U_{\phi 0}}{U_{\phi 0}} = k \sigma_k^n \eta; \quad (17)$$

$$\eta = \int_{V_0} \bar{\sigma}_i^{2+n} dV / \int_{V_0} \bar{\sigma}_i^2 dV. \quad (18)$$

Таким образом η – расчетный коэффициент, зависящий от характеристики демпфирования n , геометрии образца и распределения амплитуд интенсивности напряжений при рассматриваемой форме колебаний $\bar{\sigma}_i$.

Для расчета коэффициента η по формуле (18) используются амплитуды интенсивности напряжений, полученные на КЭМ модели образца при проведении гармонического анализа. Соотнося формулы (2) и (17), получаем значение коэффициента $k = k_0/\eta$. Полученные значения коэффициентов представлены в таблице.

**Значения коэффициентов уравнений (2), (3) и (17),
полученные после обработки результатов испытаний**

Испытания	№	Амплитудно-независимая часть демпфирования $\psi_{нач}$	Коэффициент уравнения k	Степень n	Расчетный коэффициент η	Коэффициент уравнения k_0
Свободные колебания	1	0,037529	$9,0924 \cdot 10^{-4}$	1,6403	0,5837	$1,5578 \cdot 10^{-3}$
	2	0,039198	$7,3464 \cdot 10^{-4}$	1,7238	0,5704	$1,2878 \cdot 10^{-3}$
Вынужденные колебания	3	0,066248	$2,7125 \cdot 10^{-3}$	1,0893	0,6850	$3,9599 \cdot 10^{-3}$
	4	0,096997	$5,3271 \cdot 10^{-4}$	1,4453	0,6165	$8,6404 \cdot 10^{-4}$

Применение полученных зависимостей при численном моделировании

Численное моделирование проводилось с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS. Для применения уравнения (3) при расчете из набора существующих в ПК ANSYS параметров демпфирования были выбраны следующие. DMPRAT – постоянный частотно-независимый коэффициент демпфирования, применяемый лишь при решении задач методом суперпозиции. Ему присваивается значение $\psi_{нач}$. Для задания амплитудно-зависимой части использовался коэффициент демпфирования DMPR – постоянное конструкционное (гистерезисное) демпфирование, задаваемое в материале. Данное демпфирование применимо как при прямом интегрировании, так и при методе суперпозиции. Матрица демпфирования $[C]$ из уравнения (1) при использовании этих двух видов демпфирования принимает следующий вид [4]:

$$[C] = \sum_{j=1}^{N_m} \frac{m_j}{\pi \bar{\Omega}} [\Phi^T] [K_j] [\Phi] + [\Xi], \quad (19)$$

где m_j – значение DMPR; N_m – количество материалов с DMPR; $\bar{\Omega}$ – частота возбуждающей силы (the forcing frequency), $[\Phi]$ – матрица форм (matrix of the mode shapes); $[K_j]$ – матрица жесткости части конструкции с заданным материалом j ; $[\Xi]$ – диагональная матрица с элементами главной диагонали со значениями DMPRAT.

Явное задание амплитудно-зависимых параметров демпфирования в программном комплексе ANSYS не предусмотрено. Для реализации возможности задания переменного демпфирования в зависимости от напряжения каждому элементу настроенной конечно-элементной модели образца был присвоен оригинальный материал. Далее был реализован итерационный алгоритм с использованием встроенного командного языка APDL. Общий принцип действия алгоритма представлен на рис. 7 в виде блок-схемы.

Начальными условиями для алгоритма являются значения параметров n , k_0 , $\psi_{нач}$ из таблицы, а также расчетная частота $freq$ и уровень нагружения F , значение начального демпфирования d_{init} , при котором рассчитываются предварительные значения напряжений в элементах образца и значение относительной погрешности, которое является критерием для оценки сходимости цикла.

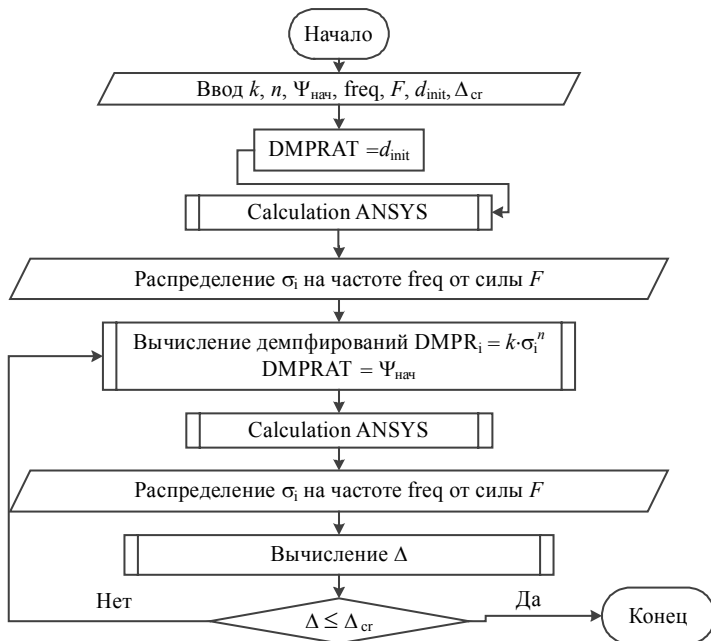


Рис. 7. Блок-схема процесса вычисления напряжений с учетом амплитудно-зависимого демпфирования

Fig. 7. Flow diagram for the stress calculating with allowance for amplitude-dependent damping

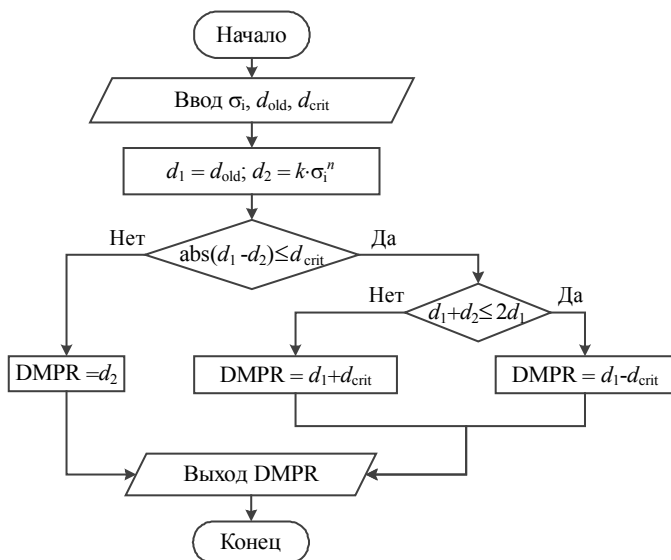


Рис. 8. Блок-схема процесса вычисления коэффициентов демпфирования DMPR в материале

Fig. 8. Flow diagram for the calculating of material damping coefficient DMPR

Значение начального демпфирования d_{init} выбирается таким, чтобы предварительное распределение напряжений в образце, по которому будут определены значения коэффициента демпфирования DMPR, были не слишком велики. После присвоения материалам значений коэффициента демпфирования DMPR заново проводится расчет напряжений в элементах образца. Полученные распределения сравниваются и, если условие сходимости не удовлетворяется, то расчет коэффициентов демпфирования и уровней напряжения проводится заново до тех пор, пока условие сходимости не будет выполнено. При этом изменение коэффициентов демпфирования DMPR в материалах происходит постепенно. Алгоритм изменения коэффициентов демпфирования представлен на рис. 8. В случае если после перерасчета разница нового и старого значения DMPR будет больше некоего значения d_{crit} , то старое значение просто увеличивается или уменьшается на это значение. Значение d_{crit} в процессе вычисления уменьшается для уменьшения количества расчетов.

Критерий сходимости описывается следующим уравнением:

$$\left(\Delta_i / \sigma_i^{\text{new}} + \Delta_i / \sigma_i^{\text{old}} \right) / 2 \leq \Delta_{\text{cr}}, \quad (20)$$

$$\Delta_i = \left| \sigma_i^{\text{new}} - \sigma_i^{\text{old}} \right|,$$

где Δ_{cr} – критерий сходимости; σ_i^{new} – значения амплитуд эквивалентных напряжений из последнего расчета; σ_i^{old} – значения амплитуд эквивалентных напряжений из предыдущего расчета.

Заключение

Коэффициенты демпфирования, полученные по усреднённой амплитуде при анализе результатов затухающего процесса колебаний и при анализе АЧХ вынужденных колебаний образца, являются интегральными, иными словами, складываются из суммы «мгновенных», переменных в процессе колебаний коэффициентов демпфирования. Существующие способы обработки экспериментальных данных предлагают решения для определения этих «интегральных» коэффициентов демпфирования в зависимости от уровней напряжений в материале. Однако применение данных зависимостей сильно осложнено тем, что коэффициенты демпфирования получаются связанными с деформациями/перемещениями, что делает решение задачи нелинейным и требует применения итерационных методов решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никоноров А., Шишмарев А. Цифровой двойник // Сибирская нефть. 2017. № 3/140. С. 44–49. URL: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2017-april/1119180/> (дата обращения: 10.05.2018).
2. Цифровой двойник – элемент, которого так не хватало! // CAD/CAM/CAE Observer. 2017. № 6(114). С. 56. URL: <http://www.cadcamcae.lv/N114/56.pdf> (дата обращения: 10.05.2018).
3. Виброиспытания космических аппаратов / Б.П. Соустин, Н.А. Тестоедов, А.Г. Рудомёткин, А.В. Алькин. Новосибирск: Наука, 2000. 175 с.
4. ANSYS® Mechanical APDL, Release 18.1, Help System, Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc.
5. Давиденков Н.Н. О рассеянии энергии при вибрациях // Журн. техн. физики. 1938. Т. 8. Вып. 6. С. 438–499.

6. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. Киев: Изд-во АН УССР, 1962. 436 с.
7. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. Киев: Наукова думка, 1971. 375 с.
8. Khan S.U., Li C.Y., Siddiqui N.A., Kim J.-K. Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes // Compos. Sci. Technol. 2011. V. 71. P. 1486–1494. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.03.022.
9. Elliott S.J., Ghandchi Tehrani M., Langley R.S. Nonlinear damping and quasi-linear modeling // Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci. 2015. V. 373. No. 20140402. P. 1–30. DOI: 10.1098/rsta.2014.0402.
10. Вибрации в технике: Справочник: в 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И.И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.
11. Матвеев В.В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с.
12. Шопр Б.Ф., Серебряков Н.Н. Расчетно-экспериментальный анализ амплитудно-зависимых характеристик демпфирования в деталях и материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 3. С. 91–99.

Статья поступила 01.06.2018г.

Kazakova O. I., Smolin I. Yu., Bezmozgiy I. M. (2018) ANALYSIS OF AMPLITUDE-DEPENDENT DAMPING AND ITS APPLICATION IN NUMERICAL CALCULATIONS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 54. pp. 66–78

DOI 10.17223/19988621/54/6

Keywords: vibration, stress state, amplitude-dependent damping, finite element modeling.

Digital twins are becoming an essential part of the product designing. In the rocket and space technology, a dynamic finite element model represents the important component of the digital twin. This model is required to be capable of predicting behavior of the structure under dynamic load with a reliable accuracy. At the same time, calculations of the design response with allowance for amplitude-dependent damping are impossible by the modern finite element software.

This article presents the test results of flat aluminum alloy samples which are the time characteristics of free damped oscillations and amplitude-frequency characteristics of forced oscillations of samples. An analysis of test results was carried out using the existing methods for obtaining dependences of the dumping on the equivalent (von Mises) stress in the material.

The paper describes a damping matrix formation for numerical calculations using constant damping coefficients. Also, the article proposes an iterative algorithm, which enables the application of amplitude-dependent damping coefficients in the harmonic analysis.

KAZAKOVA Olga Igorevna (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Russian Federation, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: okazakova.rsc@gmail.com

SMOLIN Igor Yurievich (Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (ISPMS), Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: smolin@ispms.ru

BEZMOZGIY Iosif Mendelevich (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Russian Federation, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). Email: ibezmozgiy@yandex.ru

REFERENCES

1. Nikonorov A., Shishmarev A. (2017) Tsifrovoy dvoynik [Digital twin]. *Sibirskaya nef't – Siberian Oil*. 140(3). pp. 44–49. Access mode: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2017-april/1119180/>.
2. (2017) Tsifrovoy dvoynik – element, kotorogo ne khvatalo [Digital twin is an element that has been missing]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 114(6). P. 56. Access mode: <http://www.cadcamcae.lv/N114/56.pdf>.
3. Soustin B.P., Testodov N.A., Rudometkin A.G., Al'kin A.V. (2000) *Vibroispytaniya kosmicheskikh apparatov* [Vibration tests of space vehicles]. Novosibirsk: Nauka.
4. ANSYS® Mechanical APDL, Release 18.1, Help System, Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc.
5. Davidenkov N.N. (1938) O rasseyanii energii pri vibratsiyakh [On energy dissipation during vibrations]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*. 8(6). pp. 438–499.
6. Pisarenko G.S. (1962) *Rasseyanie energii pri mekhanicheskikh kolebaniyakh* [Energy dissipation during mechanical oscillations]. Kiev: Izd. AN USSR.
7. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. (1971) *Vibropogloshchayushchie svoystva konstruksionnykh materialov: Spravochnik* [Vibration-absorbing properties of structural materials. Handbook]. Kiev: Naukova dumka.
8. Khan S.U., Li C.Y., Siddiqui N.A., Kim J.-K. (2011) Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Compos. Sci. Technol*. 71. pp. 1486–1494. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.03.022.
9. Elliott S.J., Ghandchi Tehrani M., Langley R.S. (2015) Nonlinear damping and quasi-linear modeling. *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci*. 373(20140402). pp. 1–30. DOI: 10.1098/rsta.2014.0402.
10. Chelomey V.N., Blekhman I.I. (1979) *Vibratsii v tekhnike: spravochnik. T. 2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem* [Vibrations in engineering: Handbook. Vol. 2. Oscillations of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Mashinostroenie.
11. Matveev V.V. (1985) *Dempfirovanie kolebaniy deformiruemykh tel* [Damping of oscillations of deformable bodies]. Kiev: Naukova dumka.
12. Shorr B.F., Serebryakov N.N. (2011) Numerical-experimental analysis of amplitude-dependent damping performances in components and materials. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 40(3) pp. 272–279. DOI: 10.3103/S1052618811020166.